



ESTUDO PRELIMINAR SOBRE O EFEITO DA GEOMETRIA DO PINO NO PROCESSO DE SOLDAGEM FHPP ENTRE O FERRO FUNDIDO NODULAR FE55006 E O AÇO SAE 8620



PRELIMINARY STUDY ON EFFECT OF ROD GEOMETRY IN FHPP BETWEEN FE55006 NODULAR CAST IRON AND SAE 8620 STEEL

MARTINAZZI, Douglas^{1*}; LEMOS, Guilherme V. B.¹; LANDELL, Renan M.¹, BUZZATTI, Diogo T.¹; BRUSIUS, André¹; REGULY, Afonso¹.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Av. Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia, 91509-900, Porto Alegre/RS - Brasil (fone: +55 51 3308 3565)

* Autor correspondente
e-mail: martinazzi.douglas@gmail.com

Received 25 October 2018; received in revised form 29 November 2018; accepted 1 December 2018

RESUMO

A aplicação das ligas de ferro fundido nodular é uma ótima alternativa na fabricação de eixos motores devido às propriedades e características deste material. Porém, a necessidade de unir os eixos a engrenagens e outros componentes metálicos fabricados em aço impõe dificuldades ao projeto e aos processos de fabricação. Os métodos tradicionais de união com fusão, aplicados a materiais metálicos ferrosos dissimilares, são pouco estudados. Neste contexto, é sabido que materiais diferentes possuem pontos de fusão distintos e podem ocasionar dificuldade na soldagem, além de defeitos de solidificação. Portanto, métodos modernos de união, como o processo *Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)*, são uma ótima alternativa. Nesta tecnologia, um pino consumível é rotacionado contra uma base, gerando o calor necessário, promovendo materiais no estado plástico e formando a solda. Assim, este trabalho apresenta o estudo preliminar do processo FHPP entre o ferro fundido nodular FE55006 e o aço SAE 8620 e avalia a influência da geometria do pino na microestrutura e nas tensões superficiais das juntas soldadas. Foram utilizadas duas geometrias de pino e produzidas duas soldas. Os resultados indicaram que um aumento na área de contato do pino promoveu uma menor tensão superficial, assim como uma melhor junta soldada.

Palavras-chave: FHPP, ferro fundido nodular, SAE 8620, tensão superficial.

ABSTRACT

Nodular cast irons are an excellent alternative in manufacturing process of axels due to their characteristics and good mechanical properties. However, the necessity of joining the axels to the gears and other components, made in carbon steel, is a great challenge. Traditional fusion welding methods applied to dissimilar ferrous materials are not deeply studied. In this context, it is well known that different materials have distinct melting points which can cause difficulty in welding, besides of defects formation from solidification. Therefore, modern joining processes such as *Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)* are a great alternative. In this technology, a consumable rod is rotated against to a base material, generating the heat due to the friction, promoting materials in the plastic state and then producing the weld. Hence, this work presents a preliminary study of FHPP between the FE55006 nodular cast iron and SAE 8620 steel and evaluates the rod geometry influence on microstructure and surface stresses of the welded joints. Two rod geometries were used and two welds were further produced. The results indicated that an increase in the rod contact area promoted a lower surface stress as well as a better welded joint

Keywords: FHPP, nodular cast iron, SAE 8620, surface stress.

INTRODUÇÃO

Os princípios básicos da metalurgia e o diagrama Fe-C indicam que os aços são ligas à base de ferro-carbono que possuem menor porcentagem de C, em comparação aos ferros fundidos. Assim, de modo geral, os ferros fundidos tendem a apresentar maior dureza do que os aços. Segundo Chiaverine 2005, as ligas de ferro fundido nodular caracterizam-se pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. Algumas ligas podem chegar até 820 MPa de resistência a tração. Neste contexto, o ferro fundido nodular da série FE 55006 é comumente utilizado em componentes que necessitam de elevada resistência ao desgaste e à tração. Além disso, as ligas de ferro fundido nodular são frequentemente utilizadas em plantas de energia eólica para a fabricação dos componentes do rotor, de eixos, dos suportes dos rolamentos e na estrutura em geral devido a boa resistência combinada com a tenacidade apropriada, mesmo em baixas temperaturas (Heine, Bezold e Broeckmann, 2018). Com um custo relativamente baixo (em comparação ao aço), a liga possui uma boa demanda por parte da indústria (Mundo Da Usinagem, 2010). Porém, o ferro fundido possui uma baixa soldabilidade devido ao alto carbono equivalente que pode variar entre 3,0 a 5,0% dependendo da liga (Zeemann, 2003). Essa característica dificulta a união do material através dos processos de soldagem tradicionais a arco elétrico, uma vez que possibilita a criação de microestruturas que podem fragilizar o material. Dependendo da velocidade de resfriamento, e da temperatura atingida durante o processo, pode ocorrer a transformação do ferro fundido nodular em ferro fundido branco (extremamente frágil) ou o metal de solda em um aço temperado (Zeemann, 2003). Por outro lado, o aço carbono SAE 8620 é conhecido por sua boa temperabilidade e soldabilidade, além de ser diversas vezes utilizado como aço para cementação.

Processos de soldagem tradicionais como eletrodo revestido, MIG/MAG, TIG, entre outros, são pouco utilizados para união entre materiais metálicos ferrosos dissimilares. Deste modo, a utilização de métodos modernos de soldagem no estado sólido, como o processo FHPP, para união entre o ferro fundido e o aço carbono torna-se uma ótima opção. O processo de soldagem por fricção já se mostrou eficiente em diversas soldagens de materiais dissimilares.

Winiczenko e Kaczorowski (2013) conseguiram soldar barras de 20 mm de diâmetro de ferro fundido dúctil com aço inoxidável AISI 321 e por meio da análise microestrutural verificaram que ocorre difusão entre os elementos de cada material. Os estudos de Choi, Liu e Fujii, 2018, apresentaram chapas de titânio e alumínio unidas pelo processo Friction Stir Welding (FSW), e os autores obtiveram como resultados juntas com resistência a tração próximo de 100 MPa. Soldas dissimilares entre ligas de aços de médio e alto carbono também já foram estudadas e tiveram sua microestrutura final relacionada com os parâmetros utilizados (Ratković *et al*, 2016). Sahin (2005) soldou barras de 10 mm de diâmetro de aço rápido (HSS-S 6-5-2) e aço médio carbono (AISI 1040) pelo processo de soldagem por fricção e conseguiu juntas com propriedades mecânicas similares a dos metais base. A técnica foi eficaz na união de materiais com temperaturas de fusão distintas. Yasui *et al*. (2018) conseguiram realizar a união entre barras de alumínio (AA6063) e de aço (S45C) por meio de uma solda circunferencial pelo processo de FSW. Os autores conseguiram realizar soldas livres de defeitos e com uma resistência mecânica de 117 MPa, um pouco abaixo do material base. Song *et al*. (2008) conseguiram soldar com sucesso barras de 20 mm de diâmetro de alumínio (AA 1050) e ferro fundido nodular pelo processo de *rotary-friction-welding*. No estudo, os autores verificaram que a formação de intermetálicos concentra-se na periferia da junta, o que reduz a resistência mecânica nessa área.

O processo FHPP é uma técnica utilizada para reparos em estruturas metálicas. Após a identificação do defeito, um procedimento de usinagem é realizado para a remoção do volume de material onde o defeito está localizado, deixando um furo com profundidade e geometria na superfície da estrutura. Assim, o reparo ocorre por meio do preenchimento do furo com um pino consumível, que ao entrar em contato com o fundo do furo, em alta velocidade rotacional e dada força axial gera o atrito necessário entre as superfícies, promovendo o aquecimento e a plastificação do material do pino e da superfície do furo previamente usinado (Landell, 2016; Chludzinski, 2011). O processo pode ser dividido em cinco etapas conforme apresentado na Figura 1: (i) o pino é rotacionado até a velocidade pré-determinada e aproximação do furo; já nas etapas (ii) e (iii) o pino entra em contato com o fundo do furo e o calor é gerado a partir do atrito

resultante da força compressiva de contato entre as superfícies, ocasionando a plastificação e o preenchimento da cavidade conforme o pino é inserido no furo; na etapa (iv) a rotação é interrompida, podendo a força axial ser mantida ou aumentada, caracterizando a etapa conhecida como forjamento; ao final, etapa (v), o excedente do pino pode ser removido por usinagem e, assim, o reparo vai estar completo (Landell, 2016; Chludzinski *et al*, 2011; Xu *et al*, 2015).

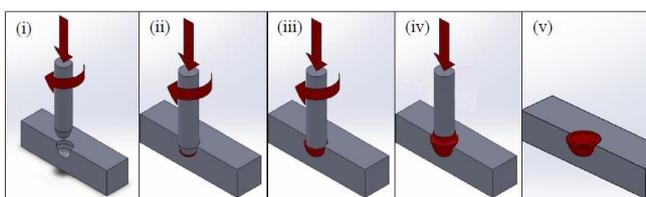


Figura 1. Etapas do processo FHP (Landell, 2016).

Neste método de soldagem, as geometrias do pino e do furo da base são importantes para formação de uma boa solda (Meyer, 2004). Estas características geométricas influenciam o fluxo de material, causando efeito no preenchimento do furo e a expulsão de impurezas (filmes de óxidos, graxas, etc) junto à rebarba (Meyer, 2004; Landell, 2016). Meyer, 2004, realizou diversas soldas variando os raios dos furos e dos pinos e verificou que a utilização de geometrias mais arredondadas evitam o aparecimento de defeitos na ponta do pino. Os estudos de Xu *et al.* 2015, com auxílio da simulação numérica, também mostraram que furos com raios mais arredondados e maiores tendem a resultar em soldas sem defeitos e um melhor escoamento do material plastificado. Ainda, a utilização de uma área de contato maior possibilita a aplicação de forças compressivas mais elevadas, sem que a tensão ideal de soldagem seja superada, principalmente no início do processo, etapa onde o fornecimento de um aporte térmico suficiente é crítico. Assim, uma maior área de contato evita que a ponta do pino se deforme excessivamente no início da solda, e acabe depositando material na parede do furo antes do correto preenchimento e aquecimento dos materiais próximos ao fundo da cavidade (Buzzatti, 2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

O processamento dos materiais foi realizado no equipamento MPF 1000, desenvolvido pelo LAMEF – UFRGS. A máquina de soldagem pode ser vista na Figura 2. O equipamento possui uma potência máxima de 132 KW, com velocidade de rotação de até 1750 rpm, um atuador hidráulico com capacidade de carga axial de até 1000 kN e deslocamento vertical de até 150 mm. O material utilizado para fabricação dos pinos foi o ferro fundido nodular FE55006 e para a base o aço ferramenta SAE 8620. Assim, a Tabela 1 mostra as composições químicas da barra utilizada para confeccionar os pinos consumíveis (ferro fundido) e também da barra chata utilizada para fabricar o metal base (aço). A análise da composição química foi realizada com um Espectrômetro de emissão óptica (marca SPECTO - modelo Spectrolab).

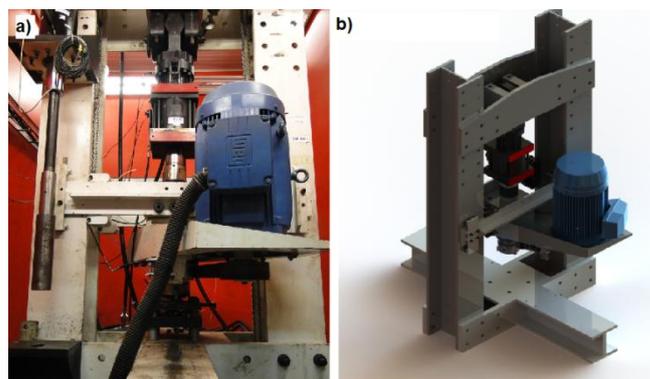


Figura 2. Equipamento MPF 1000 a) imagem real; b) desenho em solid works.

Tabela 1. Composição química (% em massa).

Elementos	C	Si	Mn	S	Cr
FE55006	> 2,1	0,690	0,045	0,119	0,009
SAE 8620	0,175	0,221	0,805	0,010	0,455
	Ni	Cu	Mg	Al	Fe
	<0,005	<0,01	0,006	0,006	Bal.
	0,40	0,214	<0,01	0,023	97,5

Nesse trabalho foram produzidas duas juntas soldadas para estudo do efeito da geometria do pino na qualidade final da solda através das geometrias ilustradas na Figura 3. Neste contexto, os principais fatores analisados foram: área superficial inicial (representada pelo contato entre o raio da ponta do pino e o raio do fundo do furo) e a variação da área de contato ao longo do comprimento do pino a partir da redução da altura relativa à parte cônica.

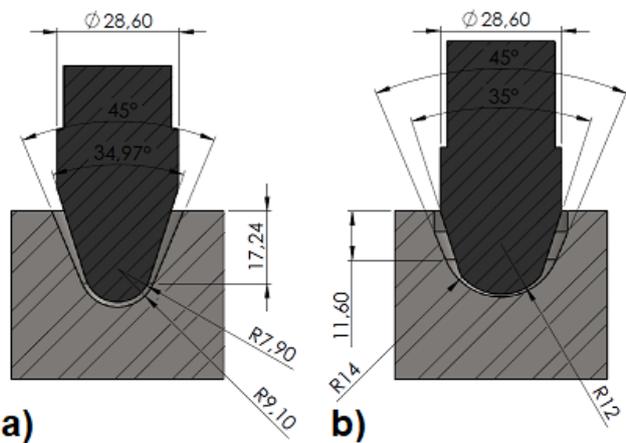


Figura 3. Geometria e dimensões das juntas soldadas a) amostra 1; b) amostra 2.

Para a soldagem das amostras foram utilizados os seguintes parâmetros: velocidade de rotação de 1600 rpm, força axial de 50 kN e deslocamento vertical de 7 mm. Para a amostra 1, observou-se um tempo de soldagem menor, em comparação ao tempo de processamento da amostra 2. Portanto, esta diferença pode estar relacionada com a mudança dos raios na ponta do pino, onde a amostra 1 possui um diâmetro menor e, portanto, deformou-se plasticamente com mais facilidade (para a mesma força aplicada).

Após a união entre os materiais, as soldas foram cortadas e preparadas de acordo com as práticas básicas de metalografia (lixadas e polidas) e, posteriormente, atacadas com o reagente Nital 10%. Por fim, as microestruturas foram analisadas em um microscópio ótico.

As propriedades mecânicas da melhor solda (amostra 2) foram analisadas através de medições de microdureza realizados na seção transversal da junta soldada. O perfil de microdureza Vicker foi obtido com carga de 300 g e distância entre as indentações de 0,2 mm.

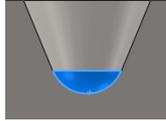
RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Geometria do pino e tensão superficial

A área superficial de contato foi modificada para aumentar o raio da ponta do pino e do furo e a conseqüente redução da tensão resultante. Portanto, a influência da área superficial em relação à tensão superficial pode ser vista na Quadro 1. Para o cálculo da tensão, assumiu-se que existe o contato entre toda a superfície da ponta do pino com o furo. Segundo

Ambroziak e Gul (2007) a geometria do pino e do furo tem papel fundamental na definição dos parâmetros de soldagem.

Quadro 1. Área superficial da ponta do pino superficial com a tensão.

Área/Furo	Área - Pino	Área Inicial de contato (mm ²)	Altura da parte cônica (mm ²)	Tensão (MPa)
 AMOSTRA 1		274,2	22,5	182
 AMOSTRA 2		325,3	15,75	154

Obs: Carga Aplicada: 50 (kN)

O comprimento da seção cônica dos pinos também foi variado, pois a diferença de diâmetros entre o início e o final de cada pino, durante o seu processamento, resulta em um gradiente de tensão a partir do momento em que a carga de soldagem atinge o valor máximo durante o seu processamento. No caso das geometrias utilizadas, a geometria 1 (amostra 1) esteve exposta a uma variação de tensão durante seu processamento mais significativa, tendo em vista que seu diâmetro inicial é menor. Os ângulos de saída para o escoamento do material permaneceram iguais, porém na amostra 2 o ângulo ao longo do furo não é constante. Neste sentido, ao chegar a 5 mm da superfície da base, ele varia para um ângulo de 90° em relação à face. Essa mudança auxilia na retenção do material dentro do furo, possibilitando uma maior pressão hidrostática entre os materiais do pino e da base e, portanto, melhorando o preenchimento e minimizando a possibilidade de formação de trincas nesta região durante o resfriamento.

Caracterização microestrutural preliminar

A Figura 4 apresenta microestruturas não afetadas pelo processo de FHPP, ou seja, os materiais de base. Neste sentido, a Figura 3a mostra a microestrutura do pino fabricado em

ferro fundido nodular, onde observou-se ferrita e nódulos de grafita. Por outro lado, a microestrutura característica do aço SAE 8620 foi ferrita pró eutetoide e perlita, como pode ser observado na Figura 3b.

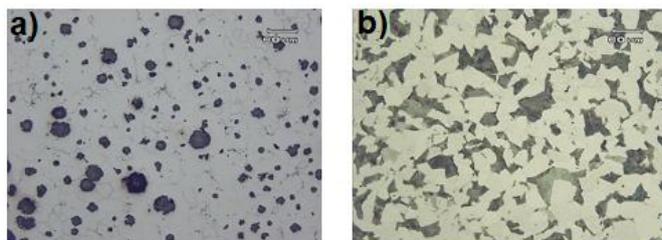


Figura 4. a) MB pino (ferro fundido); b) MB aço SAE 8620.

As Figuras 5 e 6 mostram as juntas soldadas produzidas. Para o caso da amostra 1, percebeu-se a falta de preenchimento entre a base do furo e o raio do pino. Além disso, sugere-se que ocorreu um aquecimento excessivo nesta solda, devido a presença de uma grande zona termicamente afetada (ZTA). Por fim, notou-se que esta região (ZTA) não se apresentou de forma uniforme, indicando que o aquecimento foi maior nas laterais do pino do que na base do furo.

Para a análise microestrutural preliminar proposta neste trabalho, as soldas foram analisadas em 3 locais distintos, os quais foram definidos como: região I): corresponde ao meio do pino, região II): a interface inferior (interface entre a ponta do pino e o MB) e região III): a interface lateral entre o pino e o MB.

O resultado da primeira tentativa de soldagem destes materiais, ou seja, a produção da junta soldada correspondente à amostra 1, é mostrado na Figura 5b). Para a região I, meio do pino, Figura 5a), a microestrutura foi perlita e ferrita nos contornos dos nódulos. No caso da região III (Figura 5d), as microestruturas verificadas foram martensita (no limite MB/pino) e, no MB (próximo à interface lateral), observou-se ferrita em forma de agulhas, além de agregados de carbonetos e martensita. Contudo, próximo à interface do pino, não foram observados nódulos de grafita. Por fim, a microestrutura da região II foi perlita e ferrita, além de nódulos de grafita deformados e uma trinca relativamente grande ao longo da seção transversal.

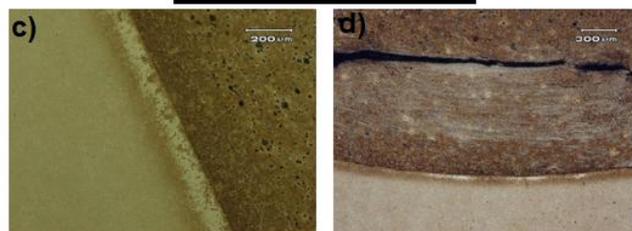
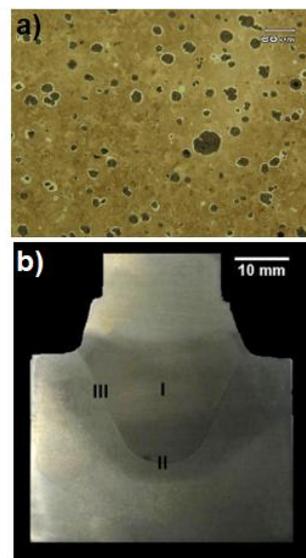


Figura 5. Junta soldada amostra 1. a) região I, b) macrografia, c) região III e d) região II.

Diversos trabalhos sobre o processo FHPP já foram realizados no equipamento MPF 1000 (Landell, 2016; Chludzinski *et al*, 2011; Buzzatti, 2017; Mattei, 2011). De modo geral, pode-se afirmar que a geometria com maior raio na ponta do pino ocasiona uma melhor solda. Portanto, baseado no *know-how* adquirido para este equipamento, e a consequente produção de soldas de boa qualidade para diversos materiais (Landell, 2016; Chludzinski *et al*, 2011; Buzzatti, 2017; Mattei, 2011; Figueiredo, 2017; Kanan, 2016) e as estimativas de tensão mostradas no presente trabalho, indica-se que a melhor junta soldada obtida entre o ferro fundido e o aço-C, correspondente a amostra 2, é a apresentada na Figura 6b). Considerando a região I, grande parte da microestrutura se apresentou como perlita e ferrita nos contornos dos nódulos (Figura 6a). As regiões II e III mostraram microestruturas semelhantes às observadas na amostra 1.

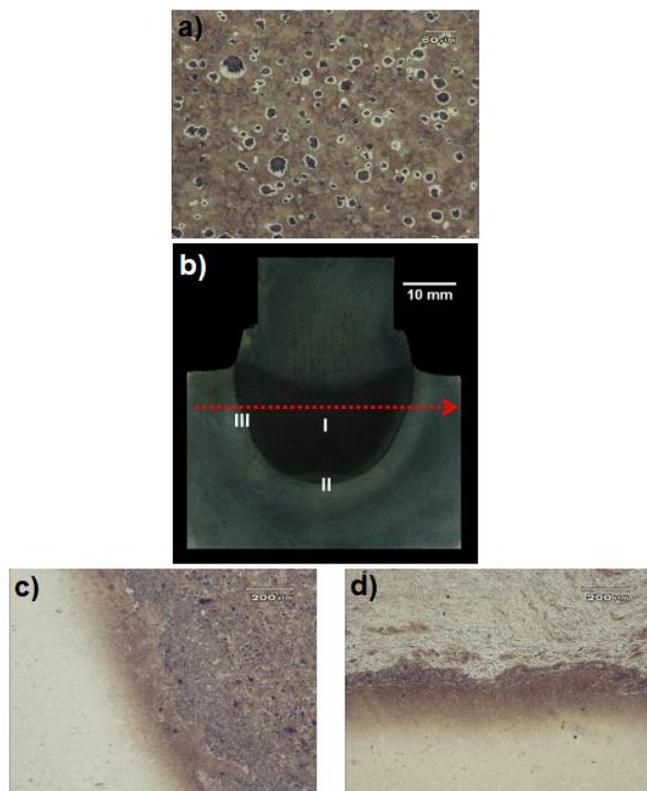


Figura 6. Junta soldada amostra 2. a) região I, b) macrografia, c) região III e d) região II.

Microdureza

O perfil de microdureza da amostra 2 é apresentado na Figura 7. As regiões medidas são indicadas pela seta vermelha (Figura 5). O metal de base alcançou valores de dureza menores, estes chegando a aproximadamente 160 Hv. Em direção a junta soldada, perceberam-se picos de dureza de até 705 Hv na interface da solda, fato que pode estar relacionado à formação localizada de martensita. Além disso, também notou-se um leve aumento da dureza na solda. Este aumento da dureza é resultado de altas temperaturas associadas a deformação plástica na região da solda. Estes fatores promoveram a recristalização dinâmica dos grãos e originam uma matriz com grãos refinados, fenômeno comumente observado na aplicação do processo FHPP em diversos materiais (MEINHARDT *et al.*, 2017).

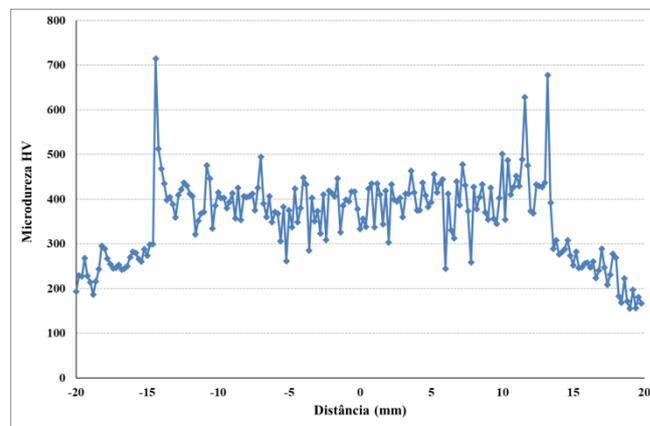


Figura 7. Perfil de microdureza na seção transversal da amostra 2.

CONCLUSÕES:

Os resultados deste estudo preliminar sobre o efeito da geometria do pino no processo de soldagem FHPP entre o ferro fundido nodular FE55006 e o aço SAE 8620 podem ser resumidos como:

* a alteração da geometria da ponta do pino (de cônica para circular) promoveu uma redução na tensão aplicada, no início do processo, evitando a deformação excessiva do material do pino e um maior aporte térmico evidenciado pelas macrografias (a ZTA da geometria cônica é maior).

* os resultados de dureza mostraram um leve aumento de dureza na junta soldada. Neste sentido, a formação local de martensita pode ter ocasionado a dureza de 705 Hv. Além disso, o refino de grão promovido pelo processo FHPP ocasionou o aumento de dureza na solda.

REFERÊNCIAS:

1. Heine L.M., Bezold A., Broeckmann C., Long crack growth and crack closure in high strength nodular cast iron. *Engineering Fracture Mechanics*, [s.l.], v. 192, p.24-53, abr. 2018.
2. GO Mundo da Usinagem: Ferro fundido nodular pode substituir o aço carbono. http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/omu65_15_03_10.pdf
3. Choi J.W., Liu H., Fujii H.. Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Al.

- Materials Science and Engineering: A, [s.l.], v. 730, p.168-176, jul. 2018.
4. Ratković N., Arsić D., Lazić V., Nikolić R.R., Hadzima B. Micro-structure in the Joint Friction Plane in Friction Welding of Dissimilar Steels. *Procedia Engineering*, [s.l.], v. 149, p.414-420, 2016.
 5. Meyer A. Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties. 2003. 135 p. Master thesis. Gemeinsamen Fakultät Für Maschinenbau Und Elektrotechnik Der Technischen Universität Carolo, Braunschweig, 2004.
 6. Landell R.M. Análise do Fluxo de Material no Processo de Soldagem por Fricção com Pino Consumível. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
 7. Chludzinski M., Paes M.P., Bastian F.L., Strohaecker T.R. Fracture Toughness of Friction Hydro-Pillar Processing welding in C-Mn steel. *Materials and Design*, 2011.
 8. Xu Y.C, Jing H.Y, Han Y.D, Xu L.Y. Numerical Simulation of the Effects of Various Stud and Hole Configurations on Friction Hydro-Pillar Processing. *International Journal of Mechanical Sciences*, China, p. 44-52, 2015.
 9. Buzzatti D.T. Avaliação da tenacidade de juntas soldadas por fricção com pino consumível em aço para amarras. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre. 2017.
 10. Mattei F. Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção. 2011. 166 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2011.
 11. Figueiredo A.P. Caracterização microestrutural e mecânica de juntas soldadas com aço inoxidável duplex UNS S31803 pelo processo Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) e Friction Taper Stitch Welding (FTSW). Tese de Doutorado. 2017
 12. Kanan L.F. Simulação numérica do processo de soldagem de tubos por atrito com anel rotativo. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre. 2016
 13. Chiaverini V. Aços e Ferros Fundidos. 2005
 14. Zeemann A. A soldagem por fusão para reconstrução de Componentes de Ferro Fundido. *Infosolda*. 2003
 15. WINICZENKO, Radosław; KACZOROWSKI, Mieczysław. Friction welding of ductile iron with stainless steel. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 213, n. 3, p.453-462, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.008>.
 16. SAHIN, Mümin. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 168, n. 2, p.202-210, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.11.015>
 17. YASUI, Toshiaki et al. Friction stir girth welding between aluminum and steel rods. *Procedia Manufacturing*, v. 15, p.1376-1381, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.345>.
 18. MEINHARDT, C.p. et al. Evaluation of friction hydro-pillar processing welding in duplex stainless steels (UNS S31803). *Journal Of Materials Processing Technology*, v. 246, p.158-166, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.010>.

19. SONG, Yu-lai et al. Strength distribution at interface of rotary-friction-welded aluminum to nodular cast iron. Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China, v. 18, n. 1, p.14-18, fev. 2008. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326\(08\)60003-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326(08)60003-5).
20. AMBROZIAK, Andrzej; GUL, Bartłomiej. Investigations of underwater FHPP for welding steel overlap joints. Archives Of Civil And Mechanical Engineering, v. 7, n. 2, p.67-76, jan. 2007. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1644-9665\(12\)60212-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1644-9665(12)60212-x).

